

玉乗りロボットの段差乗り越えに関する研究

著者	落合 恭也, 熊谷 正朗
会議概要（会議名, 開催地, 会期, 主催者等）	計測自動制御学会東北支部 第254回研究集会
URL	http://id.nii.ac.jp/1204/00000379/

玉乗りロボットの段差乗り越えに関する研究

A Study on Traveling over a Bump of a Robot Balanced on a Ball

落合恭也*, 熊谷正朗**

Takaya Ochiai*, Masaaki Kumagai**

*東北学院大学大学院, **東北学院大学

*Graduate school of Tohoku Gakuin University, **Tohoku Gakuin University

キーワード: 玉乗りロボット (Robot balanced on a ball) 倒立振り子 (Inverted pendulum),
全方向移動車輪 (Omnidirectional wheel), 段差乗り越え (Bump clear),

連絡先: 〒 985-8537 宮城県多賀城市中央 1 - 13 - 1
東北学院大学工学部 機械知能工学科 ロボット開発工学研究室
熊谷正朗, Tel.: (022)368-7358, Fax.: (022)368-7070,
E-mail: kumagai @ tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

1. はじめに

近年, 倒立振り子制御の移動手段への応用が進んでいる. 研究分野ではロボットの移動手段として以前より注目されていたが, 人間用の移動手段としても検討が進んでいる. Segway HT は実用化された人間搭乗用移動機として広まった. また, トヨタ自動車は i-swing, Winglet¹⁾ と大型, 小型の移動機を開発し, 本田技研工業も U3-X²⁾ を開発, 発表した. 従来の 2 輪型移動機は真横には移動できないという欠点があったが, この U3-X は特殊な車輪装置を開発することにより, 横方向への移動も可能とした点で, 従来の乗用機とは方向性が明確に異なる.

一方, 我々の研究室では, 玉乗りロボットの開発を行っており, 昨年, 実機の開発に成功した³⁾. その後, 改良を行い, 複数台のロボットによる協調搬送補助を容易に実現できることを実証した⁴⁾. 玉乗りロボットとは, 従来のロボットの車輪に当たる部分が単一の球体であり, こ

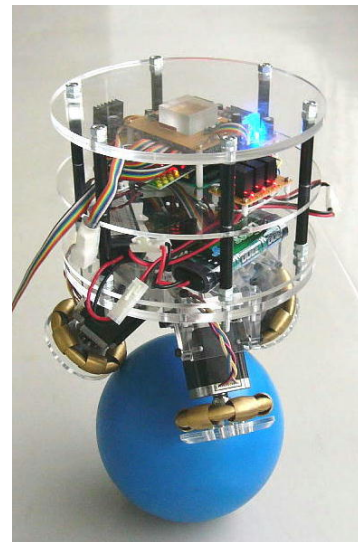


Fig. 1 玉乗りロボット. Robots that balance on a ball.

の球体を倒立振り子制御則に従って駆動することで, 姿勢維持を行い, 移動する機構としている. 球体であるため, 姿勢維持を行わない場合は転倒する.

球体を用いた同様な移動ロボットはまだ実現

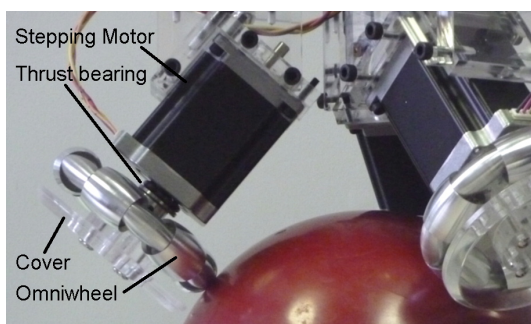


Fig. 2 球の駆動機構．Driving mechanism of the ball.

例が少ない．先駆的な例は，Lauwers らによる *ballbot* である⁵⁾．これは「ボール式マウスの機構を逆にした」と説明されるように，ローラによる球体駆動を行う．球体の側面 4 方向にローラを取り付け，平行するローラで駆動トルクを球に伝導する．もうひと組のローラの駆動で直交方向にも回転させることができるが，一組のローラの運動は，もう一組のローラでは摩擦トルクを生じるため，若干の損失があり，また，原理的に鉛直軸まわりの回転は不可能という制約がある．そのため，*ballbot* では鉛直軸まわりの駆動装置を別途追加している．本原理は単純で，構造的にも作りやすいため，その後，同方式を採用したロボットは複数が確認されている⁶⁾．

日本国内でも，実現の試みはあった．古くは江村らが倒立振子の制御研究を行った際⁷⁾，車輪移動型の倒立振子の車輪を代わりに球にすれば玉乗りになると述べている．実際に本格的な実装を試みた例としては *B.B.Rider* が知られている⁸⁾．これは全方向移動が可能な車いす状の移動体を作ることを目的に，球体にバスケットボール，駆動には特殊な全方向移動機構を用いて開発された．原理的には鉛直軸まわり回転も可能である．また，クッション性を考慮してバスケットボールを採用しており，実用面を当初から考慮していた．試作の発表はあるが，続報は見られない．

当研究室ではこれらとは独立して「玉に乗ってバランスをとるロボットが作りたい」という希

望から開発がスタートした．そのため，*ballbot* や *BBRider* では球が明確に移動装置の一部と位置づけられているのに対して，我々のロボットは「玉に乗る」形である．そのため玉乗りロボットと言っており，二者についても玉乗りとくくすることには語弊があるが，球体を駆動する倒立振子，という点では同種である．

なお，上述の本田技研工業 U3-X は全方向性はあるが，これら玉乗り系とは異なる．一般に車輪的駆動部の耐環境性 (対凹凸) はその曲率半径に依存し，大きな車輪ほど高まる．そのため，U3-X の車輪を含む多くの全方向移動ロボット用車輪は，1 方向への移動については大きな車輪として振る舞う一方，側面方向への移動は小輪，ローラなどであり，半径が極めて小さく，段差への耐性はない．それに対して球体を用いる場合は，全方向に半径が同一であるという利点もある．

我々のロボットは，これらの開発を調査せずに始めたこともあり，独自の形態をしている．浅間らによる理研型全方向移動ロボット用車輪⁹⁾を 3 個使用し，これにステッピングモータを直結してダイレクトドライブする．この 3 個の車輪で球に乗るとともに，3 自由度の回転制御を行う．全方向機構を利用したという点では *BBRider* と着想は同等であるが，本玉乗りロボットが容易に実現できた背景には，当初は実用性を全く考慮しなかったこと，全方向移動機構の選定，ステッピングモータの加速度操作型制御という特徴が有効であったと考えられる．また，当初は我々も手頃な球体としてバスケットボールを使用した，その弾性によってロボット本体の慣性との共振が生じ，姿勢制御は可能であったが，移動などの外乱に対して極めて弱い非常に不安定な制御となった．そのため対策として，剛性の高いボーリング球にゴムのコーティングをした球に代え，非常に安定した制御を実現するに至った．その後，位置制御ゲインのみを切ることと受動的に移動することを示し，物体搬送の

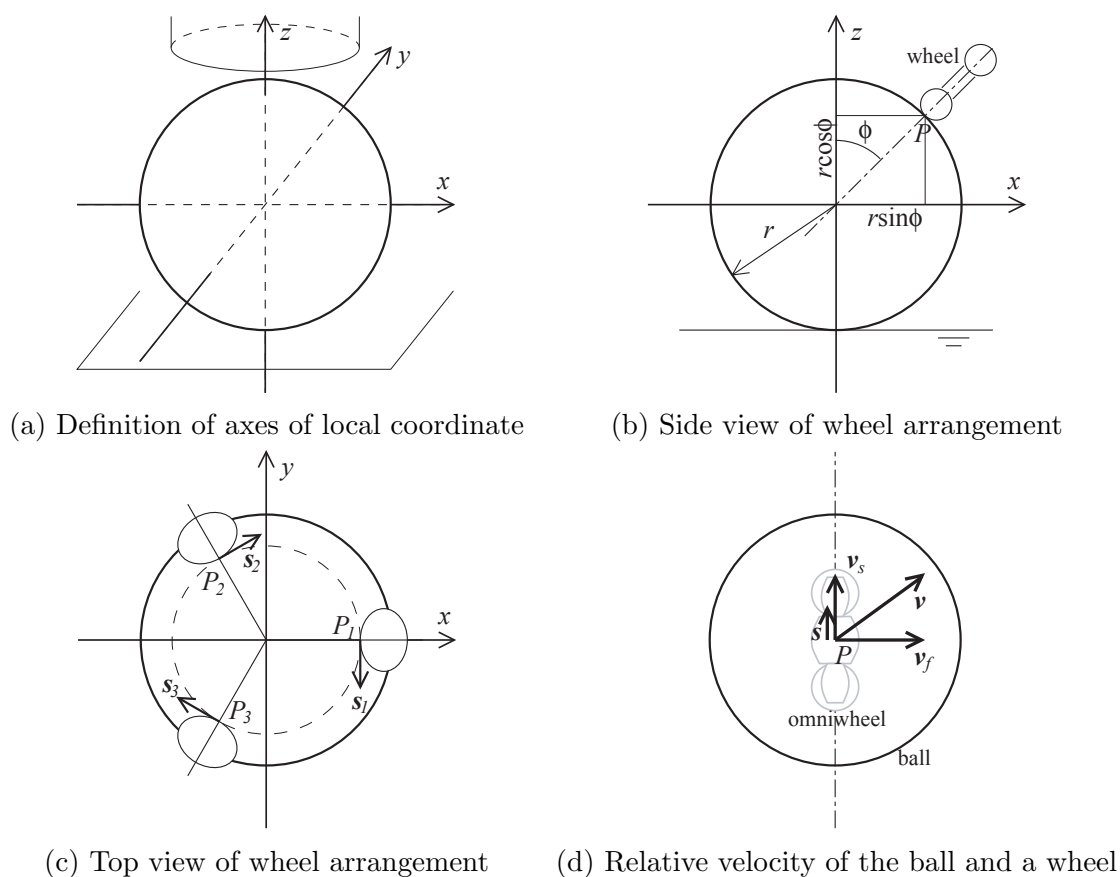


Fig. 3 球を中心とした座標系設定と，球と車輪の位置関係．Definition of axes and relationship between ball and wheels.

アシストに使えることを示した．

平面上では自在な移動が可能である本機であるが，凹凸のある地形では移動が制約される．とくに，低いものでも堅いステップ状のものは制御に致命的である．球の剛性が高いため，球が段差にあたった衝撃で急停止し，姿勢制御もできずに制御不能となる．ロボットの実用性向上という観点では，ある程度の段差への対応も必要であり，検討を開始した．やはり，球体に柔軟性を求めることが妥当と考えられたが，共振による振動の低減が課題となった．一般にはダンピング(D制御)を加えることで振動は低減できるが，もともと倒立振子は二つのD制御も含めて安定判別されるものであり，かつ，それ自体が常時揺動している．そのため，振動低減のためにD制御を直接使用ことは限界があった．試行錯誤の結果，姿勢センサの信号に「遅延を加える」という，本来は不安定化の要因とされる

ことを試みたところ，大幅に改善が見られ，段差への耐性と生じた振動の減衰という改善が見られた．

本稿では，玉乗りロボットについて簡単に述べた上で，遅延信号による振動の減衰と，その推定された減衰メカニズムについて報告する．

2. 玉乗りロボットの構造と制御

玉乗りロボットの構造，制御についてはすでに発表しており⁴⁾，ここでは要約して述べる．

2.1 玉乗りロボットの構造

ロボットの外観はFig. 1に示したとおりである．玉乗りロボットはロボット本体に取り付けた3個の全方向移動ロボット用の車輪で球に乗る形態である．この構造は，3点による支持であるため車輪が浮き上がることはなく接すること，

球の回転の3自由度を3個の車輪の独立した回転で作るために計算が単純であること、およびコストの面で適当である。もちろん、ロボットが傾いた場合でも支持する3点の内側に重心がなければならないが、そもそも倒立振子として傾斜角に限度があるため、本機においては問題ない。また、後述するように、本方式では車輪を追加することは容易である。

使用した車輪は浅間らによる方式の車輪⁹⁾である。この車輪は全方向移動ロボットの研究などにしばしば用いられているものであり、外周のローラの形状、配置を工夫したことで、車輪の外周が連続した単一面上の円となる。全方向移動用の車輪には様々な形式があるが、多くの場合は不連続な円弧の集合、またそれらが二つ以上の円を構成するものが多い。不連続な場合は接触面での振動を誘発する可能性がある。また、複数の円を構成する場合には接触点が複数生じることになり、平面上を移動する場合には大きな問題ではなくとも、球面に対応するには車輪の角度調整に厳密さが求められる。これらの点で、浅間らによる方式が適切と考えて採用した。この車輪を Fig. 2 に示すよう、球面に垂直になるように固定した。また車輪の固定位置を Fig. 3(b,c) に示す。天頂角 $\phi = 50$ [deg] の位置に方位角 120 [deg] 間隔で対称に配置した。

車輪はステッピングモータによるダイレクトドライブ方式をとっている。倒立振子はトルク、力の次元による操作が一般的であるが、加速度を操作量としても制御できる。このことは経験的に確認していたが、安定判別によっても確認した。また、加速度を操作量とした方が、物体搬送時のロバスト性が高くなることもナイキスト線図の計算から確認した*。ステッピングモータは一般的な DC モータに比較してトルクが大きいいため、車輪を直結できる。倒立振子を作る上では、ギアのバックラッシュが制御に大きく影響するため、減速機を省く意義は大きい。また、

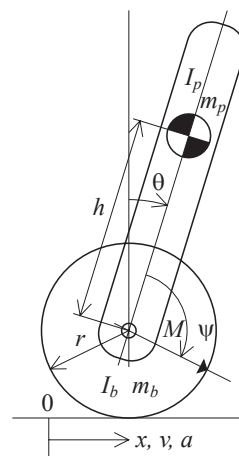


Fig. 4 ロボットの倒立振子モデル . Inverted pendulum model of the robot.

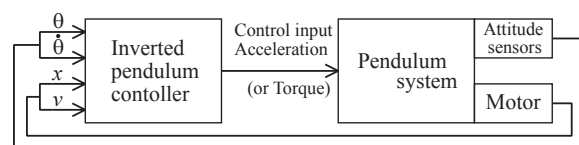


Fig. 5 ロボットの概略の制御ブロック図 . Control block diagram of the robot.

Table 1 ロボットの倒立振子モデルのパラメータ . Brief parameters of the robot

m_p	Mass of robot	8.7	[kg]
I_p	Moment inertia of r.	0.11	[kgm ²]
m_b	Mass of ball	3.8	[kg]
I_b	Moment inertia of b.	0.018	[kgm ²]
r	Radius of ball	0.11	[m]
h	Height of CoM	0.23	[m]

脱調しないかぎり指令通り動くことも、制御には好都合である。同様にステッピングモータを使用した例は多くはないが存在する¹⁰⁾。

ロボットにはこれら駆動部の上に、制御用マイコン (H8/3052)、電池 (NiMH 7.2 [V]×3)、電源回路、モータ駆動回路と、姿勢センサとして加速度センサ (重力加速度検知) とレートジャイロを直交する2軸に配した。ロボット本体の質量は約 9 [kg]、球は 3.8 [kg] であり、倒立時の全高は約 500 [mm] である。

*詳細については論文を投稿中である。

2.2 玉乗りロボットの制御

2.2.1 倒立振子制御

前述の通り，本機の制御は倒立振子制御である．基本的に，姿勢角度と移動量をPDフィードバックする江村らの制御方法⁷⁾から，単に操作量を加速度に変更したものである．PD制御という点からは古典制御的であるが，数学的には，4状態量による状態フィードバックと同等である．また，ballbotでは，ボールへの伝達トルクを操作量とする姿勢角の制御と，この姿勢角を操作量とするロボット位置制御の2重のフィードバック構造になっているが，これもほぼ同等の形である．

ロボットの2次元モデルをFig. 4に，制御系の概略のブロック図をFig. 5に示す．また，各パラメータの名称と数値をTable. 1に示す．ここで， θ がロボットの姿勢角で，基本的に鉛直を維持するよう制御する． ψ はロボットから見た車輪(球)の駆動角， $x, v = dx/dt, a = d^2x/dt^2$ はロボットの位置，速度，加速度である．これらは θ の影響を受けるが， $\theta = 0$ が前提であるため，以下では， $x = r\psi$ としている．

このモデルに基づく倒立振子制御は

$$\begin{aligned} a_x &= K_A\theta_x + K_{AV}\dot{\theta}_x + K_T(x - x_0) + K_Vv_x \\ a_y &= K_A\theta_y + K_{AV}\dot{\theta}_y + K_T(y - y_0) + K_Vv_y \end{aligned} \quad (1)$$

による．添え字の x, y はそれぞれ直交する2制御方向に関わる値で，独立に制御している． K_A, K_{AV}, K_T, K_V はそれぞれ傾斜角，傾斜角速度，目標位置 (x_0, y_0) に対する偏差，移動速度に対するゲインであり，全体で姿勢角と位置に対するPD制御となる．

これにより得た， x, y 両方向への加速度操作量を数値積分して，速度指令とフィードバックに用いる速度の実際値とする．さらに積分して位置としている．

2.2.2 車輪の速度決定

前述のようにロボットには3個の車輪を使用しており，倒立振子制御で得た速度目標を各車輪の速度に変換する．Fig. 3(d)に車輪に関する速度の関係を示す．まず，球体が $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ で回転する場合，球中心からみた車輪 i の接点の位置ベクトルを p_i とすると，その点での球の周速度は

$$v_i = \omega \times p_i \quad (2)$$

である．この速度 v は，車輪の外周方向(モータによる駆動方向)の速度 v_s と，車輪外周のローラの受動回転による速度 v_f に分離でき，かつ，外周の接線方向単位ベクトル s を用いて，

$$\begin{aligned} v_i \cdot s_i &= v_{si} \cdot s_i + v_{fi} \cdot s_i \\ &= |v_{si}| |s_i| + 0 = |v_{si}|. \end{aligned} \quad (3)$$

という関係を持つ．すなわち，車輪の位置 p_i および接線方向 s_i を定めれば，角速度 ω に対応する車輪の周速度を一意に求められる．

Fig. 3(b)(c)の配置では

$$\begin{aligned} p_1 &= (r \sin \phi, 0, r \cos \phi) \\ p_{2,3} &= \left(-\frac{1}{2}r \sin \phi, \pm \frac{\sqrt{3}}{2}r \sin \phi, r \cos \phi\right) \\ s_1 &= (0, -1, 0) \\ s_{2,3} &= (\pm(\sqrt{3}/2), (1/2), 0). \end{aligned} \quad (4)$$

と規定され，これにより最終的には

$$\begin{aligned} v_{s1} &= -v_y \cos \phi + K_z \omega_z \\ v_{s2} &= \{+(\sqrt{3}/2)v_x + (1/2)v_y\} \cos \phi + K_z \omega_z \\ v_{s3} &= \{-(\sqrt{3}/2)v_x + (1/2)v_y\} \cos \phi + K_z \omega_z \end{aligned} \quad (5)$$

とすればよい．なお， $K_z = -r \sin \phi$ は姿勢制御とは独立した旋回速度指令に対する変換定数である．

適切に車輪を配置すれば，3個の車輪で3自由度の能動回転が得られる(不適切な場合も回転はするが受動回転となる自由度が存在する)．

この加速度操作に基づく方法の利点は、車輪の数を単純に増やせることにもある。上式を満たす限り、4個以上としても変更はない。トルク操作の場合は力の分配を車輪の個数に応じて求める必要があるほか、1輪が浮いて負荷が無くなった際に急加速することを防ぐ対策が必要となる。ただし、加速度型にも欠点があり、4個以上では超過拘束となるため v, s に誤差があった場合には滑りを生じることになる。

以上が玉乗りロボットの基本的な構造および原理である。

3. 玉乗りロボットによる段差乗り越え

3.1 概要

本ロボットは平坦地(緩い傾斜,なめらかな起伏)では安定した動作が可能である。そのため、物品搬送への応用などを提案したが、バリアフリー化が進む状況においても、ロボットの期待される環境では、敷居やなにか床にあるものを踏むなどの小さな段差はあり得る。そこで、本機でも試してみたが、特別な対策を施さずに段差を乗り越えようとした場合、高さ 3 [mm] の段差でさえ越えることが難しいことが判明した。

本機が段差に衝突した場合、転倒に至る原因としてまず挙げられるのは、球の剛性の高さである。剛性が高いために、衝突時の衝撃がそのまま伝わることで転倒する主な原因であると考えられる。特に本機はステッピングモータを用いており、衝撃でひとたび脱調すると以降の制御が不能となる。条件は違うが、ある程度の段差に耐えうる例である自転車では、段差衝突時はタイヤが変形してその衝撃を和らげる。また、倒立振子型の2輪ロボットである Segway HT も、同様の理由で段差乗り越えを可能としている。

以上から、剛性の低い球を使用することを検討し、大きさや表面の摩擦力、入手のしやすい点などから、再びバスケットボールを球として

採用した。しかし、球をバスケットボールに変更したところ、移動中に激しい振動が発生することが確認された。もともと、本機の前のモデルで最初はバスケットボールを使用しており、剛性の低さによる振動が発生していた。これを回避するため剛性の高いボーリング玉に代えた経緯があり、当然といえる。

バスケットボールを使用した場合、その場で定常化しているときは、多少揺れるものの激しい振動や大きく移動するといったことはなく、安定している。しかし、外乱を加えた場合や外力で移動させた場合、激しい振動が発生し、とても不安定な状態となる。この状態のまま移動を続けると転倒する場合もあるため、振動低減の手法を検討した。一般的には振動を減衰させるために、微分制御によるダンピングが有効である。ただし、本ロボットの場合は D 制御は倒立振子制御のためのものであり変更には制約があること、また D 制御は微分演算の性質に基づく高い周波数でのノイズ等の増幅作用があり現実にはあまり高められないことから、実験では十分な効果は得られなかった。そこで、その他の方法を検討した。

3.2 振動低減の対策法

まず、振動の原因を推測した。振動が発生する原因として一番に考えられるのはボール表面にある溝である。この溝に車輪が当たることによって振動が発生する。さらに、ボールの弾性が振動をより大きなものになっているのではないかと考えた。そこで、未制御状態でボール上でロボットを強制的に上下に揺らし、高速度カメラで撮影してロボットの機械的な固有振動数を測定してみたところ、制御中に発生した大きな振動とほぼ一致することが確認できた。この固有振動との共振を低減、減衰させることが対策の一つと考えられた。

これに対し、幾つかの対策を検討した。まず一番の対策としては球の変更である。今回の振

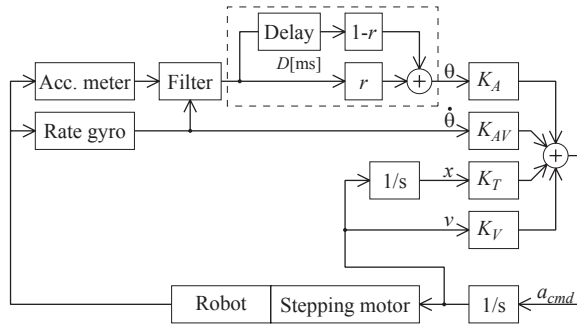


Fig. 6 信号遅延を用いた振動の低減．Reducing vibration using delay in attitude signal.

動の原因が推測したとおりであれば，少なくとも溝のない平滑な球体を使用すれば振動は発生しないと考えた．ところが，なかなか条件に一致するものを見つけることができなかった．ボーリング玉を加工することも考えたが，良い方法を見つけることができなかったため，他の方法を検討した．

次に，本体にサスペンションを搭載することで振動の伝達を絶つ，または能動的な質量を搭載し振動を打ち消すなど，本体を機械的に改良することで振動を抑制する方法を検討した．だが，これを実行するには，本体の大幅な見直しが必要となり，時間も要する．そこで，制御方法，ソフトウェア改良で振動を抑制する方法はないか検討することにした．

振動状態の計測を行った上で注目したのは，センサ信号である．正常時と異常振動発生時の状態量の時間変化を比較すると，各種状態量間の位相差が変化していた．ボールの弾性により振動が大きくなっているのであれば，センサの応速度とボールの弾性による本体のバウンドのタイミングが悪影響の原因になっている可能性がある．つまり，このタイミングをずらすことで振動の抑制が可能ではないかと直感的に考え，このタイミングを調節するために，制御に遅延を加えて実験を行った．

このための制御のブロック図を Fig. 6 に示す．もとの制御系に波線部で示した，信号遅延部分を加えた．遅延処理のパラメータは二つあり，遅

延時間 D [ms] と遅延混合比率 r ($0 < r < 1$) である．なお，図中 Filter と書かれた部分は二つの姿勢センサ信号を合成して姿勢角を得るためのフィルタであり，本来の制御系にも存在する．

この二つのパラメータを実験的に調整した結果，一度は振動が発生するが明らかに減衰するようになり，バスケットボールでも問題なく制御ができるようになった．また，それに伴い，最大で 10 [mm] までの段差を越えられるようになった．

3.3 遅延が振動減衰に与えた効果の検討

制御の基本では，フィードバック系に信号遅延を加えることは制御系の不安定化を招く（位相遅れ）要因である．しかし今回，遅延を加えたことで振動が低減したことは事実であり，その理由を検討した．

倒立振子は一般に完全に静止することではなく一定の幅，周期で揺れることが知られている．また，本問題の振動も，計測値によると明確に特定の周期を持つことが確認されている．そこで，物理的関連性はほとんど無いが，同じ振動をする系としてばねによる単振動系に単純化し，遅延を加えることの変化をシミュレーションによって検証した．

まず，ばね単振動モデルの運動方程式を，以下に示すようにおく．

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \quad (6)$$

ここで， m, c, k はそれぞれ質量，ダンパ，ばね定数を示しており， $x(t)$ は位置である． $c = 0$ であれば，減衰しない一定の振動を生じる．

そこで，外力 f として，

$$f = r x(t - D) \quad (7)$$

を加える．ここで， r は一種のゲインとなる係数であり， $x(t - D)$ が時間 D だけ遅延した位置を意味する．このシミュレーションの結果を Fig. 7

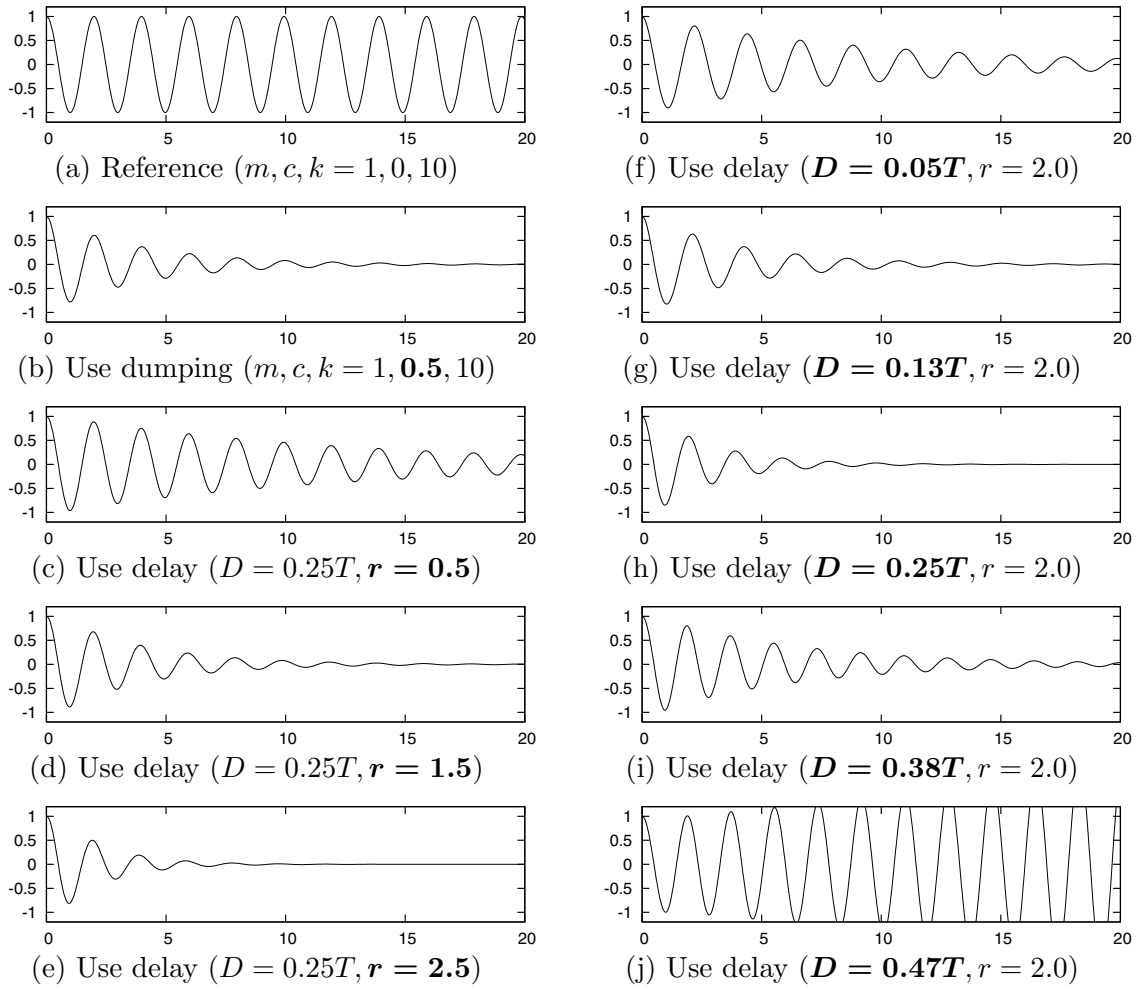


Fig. 7 単振動系シミュレーションにダンピングおよび遅延要素を加えた際の挙動 . Simulated result of spring-mass vibration with dumping and delay.

に示す . 基準は (a) であり $(m, c, k = 1, 0, 10)$, 一定の単振動である . Fig. 7(c)-(e) は r を変化させた場合であり , r を大きくすると減衰の効果が大きくなる . 遅延時間 D は振動周期 T のほぼ $1/4$ とした . 同 (b) は遅延要素は使わずにダンパを使用したものであるが , ほぼ (b) と遅延を用いた (d) の傾向に近い . また , Fig. 7(f)-(j) は遅延時間を変化させた場合であり , ある範囲の時間の遅延を加えることで , 減衰効果があることが確認できる (D がこれ以上大きくなると振幅の発散が悪化する) . また , 遅延が $1/4$ 周期の付近で最も減衰することも読み取れる .

そこで , ボールの空気圧を調節して弾性率を変化させて振動周期を変更し , その条件で最も減衰効果の得られる遅延時間を実機で確認した .

Table 2 ロボットにおけるもっとも減衰の見られた遅延時間と固有振動周期に対する位相 . Experimental result of effective delay time and phase on robot.

No.	Natural period [ms]	Most effective delay time [ms]	phase [deg]
1	150	40	96
2	170	40	85
3	200	50	90
4	230	55	86

最適な遅延時間と , 固有周期に対する位相を求めたものを Table. 2 に示す . この結果からも , 遅延時間が固有周期の $1/4(90 [\text{deg}])$ がほぼ最適と確認でき , モデルは大幅に異なるもののシミュレーションと傾向が一致する .

さて，この遅延で振動が低減可能である理由をさらに考察する．減衰の様子は，減衰係数でダンピングをかけたときに類似していることから比較する．

まず，遅延時間 D が固有周期 T の $1/4$ の場合を考える．また，減衰振動させると本来の周期からずれが生じるが，小さいため，ここでは簡単のために無視する．位置 $x(t) = \cos(\omega t)$, $\omega = 2\pi/T$ で振動しているとする，遅延した位置信号 $x(t-D)$ は

$$\begin{aligned} x(t-D) &= \cos(\omega(t-D)) \\ &= \cos\left(\omega\left(t - \frac{2\pi/\omega}{4}\right)\right) \\ &= \cos(\omega t - \pi/2) = \sin(\omega t) \quad (8) \end{aligned}$$

となる．一方，通常の減衰に用いられる微分値は

$$\dot{x} = -\omega \sin(\omega t) \quad (9)$$

である．遅延値は $f = rx(t-D)$ と右辺に与え，微分値は $+c\dot{x}$ と左辺に加えたため，符号も含めてどちらも $\sin \omega t$ として等価であることがわかる．よって，特定の振動数に対しては，遅延が微分値によるダンピングと同等の効果を持つといえる．

次に， D が $T/4$ と異なる場合に拡張する．遅延の率 a を導入して $D = aT$ とおき，同様に以下を得る．

$$\begin{aligned} x(t-D) &= \cos(\omega(t-2\pi a/\omega)) \\ &= \cos(\omega t - 2\pi a) \\ &= \cos(\omega t) \cos(2\pi a) \\ &\quad + \sin(\omega t) \sin(2\pi a) \\ &= A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \quad (10) \end{aligned}$$

後者の項 $B \sin(\omega t)$ については先に述べた減衰の効果を持つ．ただし， $B > 0$ の場合に限られるため， $0 < a < 0.5$ である．また， $a = 0.25$ で $B = 1$ となり，最大の効果が得られる．なお， $1 < a < 1.5$ も $B > 0$ となるが，ここまで遅延が大きくなると，想定している振動以外の成分

の遅延による制御悪化のほうが悪化となり，実機では制御が安定していない．

前者の項， $A \cos(\omega t) = Ax$ については，ばね単振動系で考えると，

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + kx &= rAx \\ m\ddot{x} + (k-rA)x &= 0 \quad (11) \end{aligned}$$

となるため，ばね定数が k から $k-rA$ に変化することに相当する (a に応じて増減)．これにより，系の固有周期そのものが変化する (値によっては， $k-rA < 0$ となり，振動しなくなる場合もあり得る)．

以上より，遅延 D は $a = 0.25$ ，すなわち T の $1/4$ の遅延でもっとも減衰効果が得られ，かつ多少の誤差があっても $\sin(2\pi a)$ はほぼ 1 であるため，比較的口バストに減衰効果が得られることがわかる．このことはシミュレーション結果とも，実機による実験結果の傾向とも一致している．

これらが遅延を加えたことで振動の減衰が得られたことと理由を考えている．単純には微分ゲインの増加によって減衰させればよいが，微分ゲインを上げられず，かつ振動の周期が明確な対象については，この遅延による減衰はある程度の効果が得られると考えられる．

4. おわりに

本稿では，玉乗りロボットの機能向上のため，主に段差への適応を課題とした．段差への適応には剛性の低い球によるクッション性で衝撃を緩和することが有効と考えられるが，剛性の低下に伴い，ロボット本体との共振が顕著になり，外乱への耐性が大幅に低下，失われた．試行錯誤により，姿勢角信号に遅延を加えることで振動低減が得られることを発見し，これにより安定性を確保しつつ，ロボットの段差耐性が向上した．また，通常は制御に悪影響を及ぼすとされる遅延を加えたことで振動が低減した理由を

検討した．定性的な分析にとどまるが，著者らの知る範囲では数学的な安定性証明には至らず，また適切な先行研究も見つけられなかったため，詳細は専門家にゆだねたい．

最後に，本機で使用している全方向移動車輪は理化学研究所より実施許可を頂いたこと，また，ロボットの部品の機械加工は東北学院大学工学部 機械工場の手によることをしるし，感謝申し上げる．

参考文献

- 1) トヨタ自動車株式会社: “トヨタ, パーソナル移動支援ロボット『Winglet』を開発”, http://www2.toyota.co.jp/jp/news/08/08/nt08_045.html, プレスリリース 2008/08/01 (2008)
- 2) 本田技研工業株式会社: “人との調和を目指した新たなパーソナルモビリティ技術を開発”, <http://www.honda.co.jp/news/2009/c090924.html>, プレスリリース 2009/09/24 (2009)
- 3) 熊谷正朗, 落合恭也, 今野範明: 平面上を移動可能な倒立振子の開発, 日本機械学会 Robomec08 予稿集, 講演番号 2P1-C11(CDROM) (2008)
- 4) 熊谷正朗, 落合恭也: 玉乗りロボットによる搬送に関する研究, 計測自動制御学会東北支部 第247回研究集会資料 247-3 (2008)
- 5) T.B.Lauwers, G.A.Kantor, R.L.Hollis, A Dynamically Stable Single-Wheeled Mobile Robot with Inverse Mouse-Ball Drive, ICRA 2006 予稿集 2884/2889 (2006)
- 6) Youtube <http://www.youtube.com/> にて, キーワード “ballbot” を検索
- 7) 江村超, 酒井 高男: 反動力によって立位を維持する倒立振子の研究, バイオメカニズム, 321/328 (1973)
- 8) Tatsuro Endo, Yoshihiko Nakamura: An Omnidirectional Vehicle on a Basketball, ICAR'05 予稿集, 573/578 (2005)
- 9) 浅間一, 嘉悦早人, 遠藤勲, 佐藤雅俊: 全方向移動車用車輪, 特許第 3421290 号 (2003)
- 10) 平岡延章, 則次俊郎: ステッピングモータ駆動平行2輪車のスライディングモード姿勢制御, 日本機械学会論文集C編, Vol.62 No.601 3580/3578 (1996)